

ガウスビーム変換器付ジャイロトロン FU CW GI の開発

**Development of Gyrotron FU CW GI,
including a Gaussian beam convertor**

立松 芳典, 山口 裕資, 出原 敏孝, 尾関 隆則, 酒井 俊彦,

池田 亮介, 山田 尚輝, 印牧 知廣, 小川 勇, 斉藤 輝雄

Yoshinori Tatematsu, Yuusuke Yamaguchi, Toshitaka Idehara, Takanori Ozeki,

Toshihiko Sakai, Ryosuke Ikeda, Naoki Yamada, Tomohiro Kanemaki,

Isamu Ogawa and Teruo Saito

福井大学遠赤外領域開発研究センター

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

Fukui 910-8507, Japan

Abstract

A gyrotron including a convertor to Gaussian beam has first been developed at FIR center on its own. As the convertor, a conventional helical-cut Vlasov launcher and four mirrors are adopted. To reduce the cost to make it, an existent coil magnet and an electron gun are reused. The oscillation mode has been carefully selected after investigations of its coupling with electrons emitted from the electron gun, consistency with the convertor and mode competition with other modes. Gaussian-like beam is successfully radiated from the gyrotron window. Frequency and power were measured as 202.55 GHz and 500 W, respectively.

1. はじめに

福井大学遠赤外領域開発研究センターでは、ミリ波・サブミリ波帯の光源として、これまで多くのジャイロトロンを開発してきた。そのうち、福井大学で設計・製作したジャイロトロンは、すべて直線状で、出力窓が上部にあるタイプである。このタイプのジャイロトロンでは、共振器で発振した電磁波が、共振器での複雑な空間構造の電磁界分布を保ったまま、導波管により上部窓まで伝送され、そのままの形で窓から放射される。したがって、窓から放射されるビームの電磁界は複雑な構造をもち、ほとんどの場合ジャイロトロン軸上で電界がゼロとなるような中抜けのビームである。このようなジャイロトロンを光源として用いる場合、窓からの放射ビームそのままを用いるのでは適さず、ジャイロトロン外部でビームを整形する必要がある。これを改善するための手法として、ジャイロトロンの内部でビーム形状をガウスビームに変換するような変換器を有するタイプのジャイロトロンがある。このタイプのジャイロトロンは、核融合用ジャイロトロンをはじめとして、すでに、世界では開発されている[1, 2]。そこで、福井大学遠赤外領域開発研究センターでも、内部にガウスビームへの変換器を有するタイプのジャイロトロンの開発に着手した。今年度の目標は、内部に変換器をもつジャイロトロンを設計・製作し、実際に丸い断面形状をもつビームが窓から放射されることを確認することである。

2. ガウスビーム変換器内蔵ジャイロトロンの設計

できるだけ低コストで製作するため、次の条件の下で、ジャイロトロンの設計・製作を行うことにした。

- (1) マグネットは既存の 8 T 超電導マグネットを用いる。
- (2) 電子銃も既存の FU01 または FU02 タイプを用いる。
- (3) 製作・加工は真空窓を除き、すべて福井大の工場で行う。

ガウスビームへの変換器内蔵のジャイロトロンの実現そのものが、今年度の目的であるが、その後のジャイロトロンの適用の可能性も考え、ポジトロニウム実験[3]やパルス ESR 実験[4]の光源として使用できるように、発振周波数として 203 GHz を選んだ。モード変換器の構造はコンベンショナルなものとし、ランチャーと複数枚のミラーより構成する。ランチャーは、ヘリカルカットの導波管で、導波管内はストレートとした。ミラーは 4 枚で、第 1 ミラーはランチャーからの放射電磁波を集めて、幾何光学の近似において平行ビームとするような準放物鏡とした。第 2、第 3 ミラーは平面鏡とし、ビームをジャイロトロン上部へと伝送するとともに、ビーム中心がジャイロトロン中心軸を横切るようにビーム軌道を修正する。第 4 ミラーは楕円体鏡で、ビーム形状の広がり具合を変えて、ビームを窓から出射させる。

8 T 超電導マグネットを有するクライオスタットには、ジャイロトロンを挿入する穴(ボア)があるが、その直径は 100 mm であり、ジャイロトロンのボアへの挿入部はそ

のボア径より細くする必要がある。ボア内に納めるのは、ジャイロトロンの心臓部の共振器部分で、そのまわりには、冷却のための水の層を入れる必要がある。マグネット中心からのクライオスタット上面までの距離と、共振器の上部での磁力線の広がりを見ると、ランチャーと第1ミラー、第2ミラーはボアの中に入れ、そのまわりにも冷却水層を入れるとして、光学系を納める直径は72 mmまでとした。これにより、ランチャー径、ミラー幅の大きさが制限される。この大きさは、共振器での発振モードの選択と密接に関係する。共振器での発振モードを $TE_{m,n}$ モードとし、そのモードの固有値を χ_{mn} とすると、 m/χ_{mn} が大きいほど、ランチャーからの水平面内でのビームの広がり角が小さくできるため、第1ミラーの幅を小さくできる。これを満たすには、 m は大きく、 n は小さい方がよい。一方で、発振モード数が低次すぎると、共振器径が小さくなり、製作が難しく、また、製作時の半径誤差に対する周波数誤差が大きくなるという欠点がある。また、高次になると、キャビティ径が大きくなり、これに伴ってランチャー径、ミラー幅も大きくしなければならず、指定の径内に納まらなくなる。各モードに対して以上のような考察を行い、今回発振モードの候補として、 $TE_{5,2}$, $TE_{6,2}$, $TE_{7,2}$ モードを選んだ。

次に電子銃と発振モードの整合性を考えた。電子銃は、以前に他のジャイロロンで使用し、とりはずして保管してあるものを使用する。使用候補の電子銃はFU01 またはFU02 タイプである。それぞれ、カソードエミッションリングの半径は、4.5 mm、14 mm である。電子銃は、カソード径が決まっているため、共振器での電子ビームの入射位置は制限される。これまでのジャイロロンでは、FU01 タイプを用いる場合の共振器中心ーカソード間距離は401 mm、FU02 タイプでは、第2アノードがあるため、FU01 よりも長く564 mm 程度である。今回のジャイロロンも共振器中心ーカソード間距離は、これらに倣うことにする。FU01 電子銃を用いるとして、8T超電導マグネットの磁場分布、さらに補助磁場コイルの使用を考えると、共振器入口での電子ビーム位置は、軸から0.6 mm ～1.0 mm 程度が実現できる。図1に、周波数を203 GHz としたときの R_b を変えたときの電子と $TE_{5,2}$, $TE_{6,2}$, $TE_{7,2}$ モードとの結合の係数を示す。この係数が小さいとそのモードは発振しにくかったり、発振しなかったりする。結合係数が最大となる R_b がそのモードに対して最適な電子入射位置といえる。図に示すように、 $R_b < 1.0$ mm では、3つのモード共結合係数は小さく、大きな発振

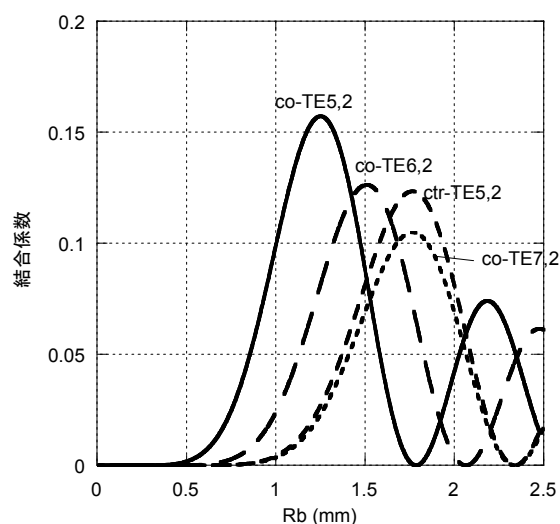


図1 周波数 203 GHz キャビティでの電子入射位置 R_b に対する各モードの結合係数

出力は期待できない。Rb を大きくするには、共振器中心ーカソード間距離を近づけるか、補助磁場コイル電流を大きくするかのいずれかであるが、前者は、電子銃をクライオスタットボア内に入れなければならないし、後者は、コイルの許容電流値を超えるため、FU01 の使用は適さない。

次に、FU02 電子銃を用いるとして、同様に考えると、可能な電子ビームの半径は $R_b > 1.2 \text{ mm}$ となり、補助磁場コイル電流 I_g を適切に選ぶことで、選択したすべてのモードに対して、最適な入射位置を達成できる。具体的には、co-TE5,2 モードに対しては $I_g \sim 21 \text{ A}$ 、co-TE6,2 モードに対しては $I_g \sim 64 \text{ A}$ 、co-TE7,2 及び cntr-TE5,2 モードに対しては $I_g \sim 114 \text{ A}$ である。次に、断熱近似がなりたつとして、電子銃形状と磁場分布から、共振器位置での電子のピッチ因子を計算してみた。その結果が図 2 である。ピッチ因子 α として 1.2 ～ 1.3 程度を達成することを考えるとその範囲は図の横帯に対応する。co-TE5,2 モードに最適電子位置を与える I_g を与えたとき、アノードーカソード間の電圧 V_{a-k} に対する α の変化量が大きく、 V_{a-k} をわずかに大きくすると、 α が急激に増大してしまい、その結果磁気ミラーによる反射で、電子はキャビティに達しない可能性がある。 α を適度な範囲に納めるためのアノード電圧の範囲が狭いため、実験時に制御が難しいことを意味する。この点からは、co-TE7,2 または cntr-TE5,2 モードがよい。

共振器半径 R_c 、ランチャー半径 R_l のとき、ランチャーから放射される電磁波がジャイロトロン軸となす間の伝搬角 ξ は $\sin^{-1}(R_c/R_l)$ と表せる。ランチャー径を大きくすれば、 ξ は小さくなる。最初、 ξ として 30 ～ 40 度を考えたが、この場合、ランチャー位置は比較的クライオスタット上部に来る。しかし、このとき、 R_b が大きいと、共振器を通りぬけた電子がランチャーにあたってしまうため、 $\xi = 25$ 度とし、ランチャー位置は少しさげることにした。この結果、変換器の大きさを考慮すると、可能な発振モードは、TE5,2、TE6,2 の co-rotating mode 及び TE5,2 の counter-rotating mode のみとなった。

最後に、実際の発振について検討した。上の 3 つのモードに対して、それぞれの最適電子位置 R_{b-opt} で計算した発振開始電流を計算したところ、TE5,2 モードでは両回転モード共、発振に問題はなさそうだが、TE6,2 に関しては TE1,4 モードが、ほとんど同じ

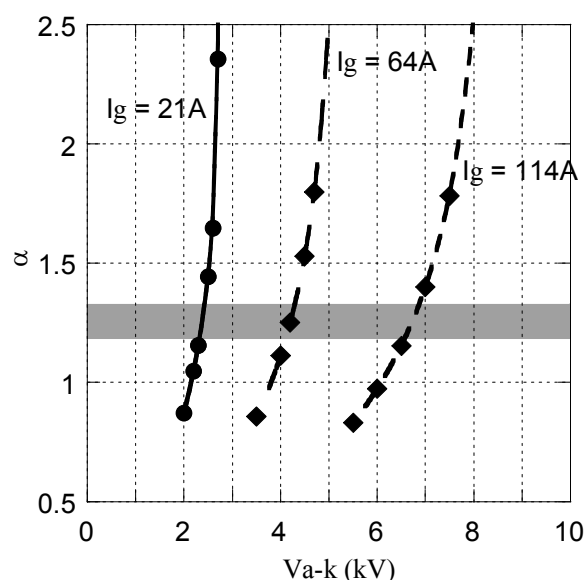


図 2 3 つの補助磁場コイル電流値に対するアノードーカソード電圧とピッチ因子の関係。Vk = 15 kV で計算。

磁場強度で発振する可能性があり、モード競合が問題になる。そこで、TE_{6,2}モードは候補からはずした。次にモード競合を考えた発振出力計算を行った。まず、共振器長Lを変え、発振パワー計算を行った結果、L = 14 mm とすることにした。Vk = 15 kV, Ib = 0.5 A, $\alpha = 1.2$ の条件での発振出力結果を図3に示す。両モード共、キャビティ出口で、最高で~2 kW の発振パワーが期待できることがわかった。さらにRb依存をみたところ、どちらの回転モード共、比較的広いRbでも発振することがわかった。このように、発振パワー計算では、coモード、counterモードの優劣はつけがたかったが、先に述べた制御性の点から、counterモードを発振モードとすることにした。ただし、コイルに流す電流を逆向きにすれば、そのままcoモード発振にも対応できる。以上のようにして決めたキャビティ形状は Rc = 2.475 mm、L = 14 mm、このときのQ値は~3000である。

ガウスビームへの変換器のうち、ランチャーのヘリカルカットの仕方は、発振モードと半径を決めれば決まる。[5] 第1ミラーの準放物鏡も、ランチャー中心からの距離を決めれば、その形状は決まる。[5] 第2、第3ミラーは平面鏡とした。第4ミラーは楕円体鏡とし、その形状を電磁界の計算コードを用いて、真空窓から放射されるビーム形状を計算しながら、表面形状決定した。図4に真空窓から460 mmにおける計算による放射電力分布を示す。

キャビティ形状及びガウスビームへの変換器の設計ができたので、ジャイロトロン全体の設計を行った。初期段階での設計図を図5に示す。ランチャーはその下のフランジと一体とし、そのフランジに第1ミラ

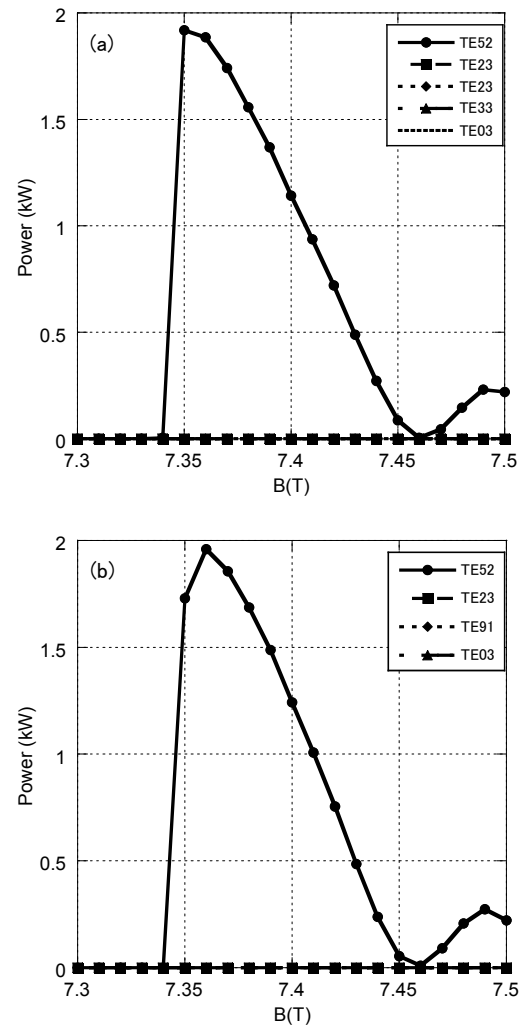


図3 モード競合計算。Vk = 15kV, Ib=0.5A, $\alpha = 1.2$ (a) Rb=1.25 mm (co-TE_{5,2}モード最適位置) (b) Rb=1.77 mm (counter-TE_{5,2}モード最適位置)

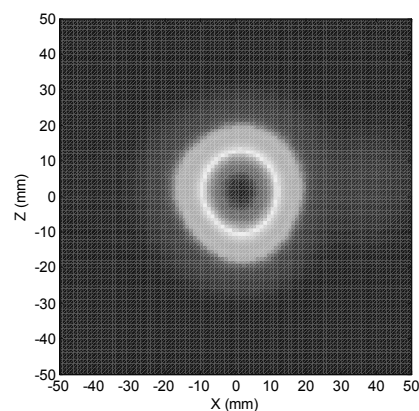


図4 窓から460 mmで予想される放射パターン

一、第2ミラーを裏からタップ留めして固定する。キャビティの外側に冷却水層を設け、フランジ側面を通じてランチャー、ミラーを冷やせるように、冷却水層はできるだけ高い位置まで伸ばした。コレクターは、キャビティでの電子入射位置を通る磁力線がコレクター側面に当たるような位置にした。

製作・加工はすべて福井大で行うことにしたので、製作段階に入ってから、ジャイロトロンの構造について検討を続け、その結果、初期の設計図からいくつかの点を変更をした。具体的には、

- (1) コレクター入口内径を大きくし、内面をテーパにし、さらに長さを長くした。
- (2) キャビティ上部の導波管のテーパ形状を変更した。
- (3) 第4ミラーは固定せず、位置調整ができるようにした。
- (4) 専用のジグを製作し、ミラー設置精度を上げた。
- (5) コレクターはジャケット式とした。

等がある。(1)は、電子軌道が予想からずれたときも、十分コレクター内に入るように、また、補助磁場コイル電流値を大きく変えても、電子がコレクター側面に当たるようにコレクター形状を変更した。(2)は当初の設計では、ランチャー手前で、導波管半径が一定の部分が短かったため、直線部をのばした。これにより、キャビティ出口からのテーパ角は大きくなったが、このテーパによるTE_{5,2}モードの他モードへのモード変換割合は5%程度である。(3)は当初は図5に示すように第4ミラーはフランジからたてたアングルに固定し、ミラー位置の調整はできないようになっていたが、設置誤差等で、万一ビームがうまく窓からでてこないときのことを考え、第4ミラーの裏側のポートにベローズをつけ、第4ミラーをとりつけた棒を溶接したフランジをベローズにとりつけることで、ミラーを可動とした。(4)については、ミラーの位置決めができるようなジグを別に製作してもらい、設置時の誤差を最小限にとどめるような工夫をした。

以上のような検討を経て、実際に製作し、マグネットに据え付けたジャイロトロンの写真を図6に示す。このジ

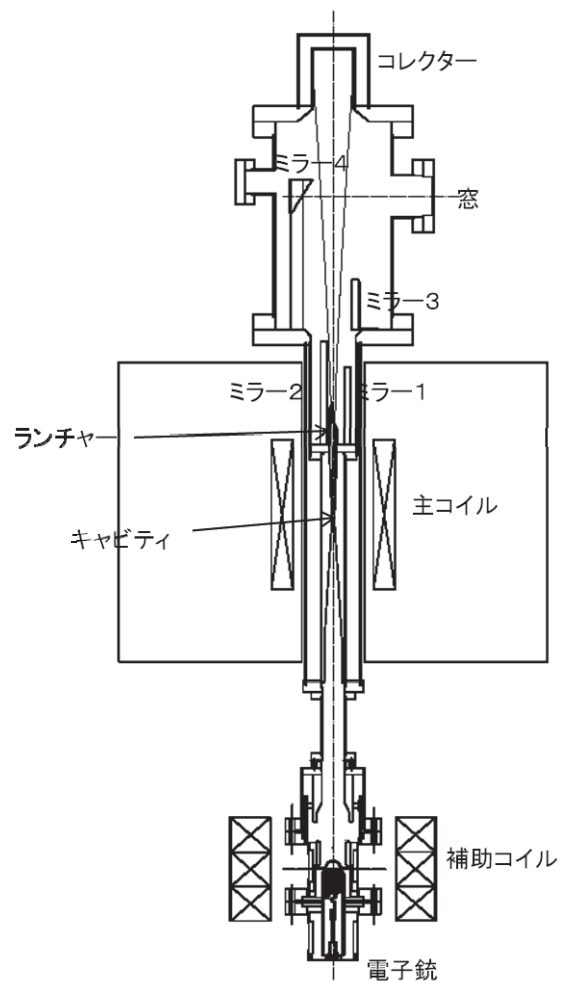


図5 FU CE GI 初期設計図

ジャイロトロンはFU CW GI と呼ぶことにする。

3. 実験結果と考察

最初に、ジャイロトロン窓の前面に焦電型検出器を置き、パルス運転を行い、窓から放射される電磁波の検出を試みた。最初はなかなか、発振信号は得られなかったが、磁場強度を高くし、アノード-カソード間電圧 V_{a-k} を大きくすると、小さいながらも信号を観測できた。ミラーの初期設置位置のままでは、出力ビームが必ずしも窓中心を通っていないかもしれないため、検出器の位置を窓前面で動かしたところ、検出器を窓の上端付近に置いたとき、信号強度は最大となった。このことから、窓からのビームは水平方向にはほぼ期待通りの位置に出ているが、上下方向には上方向に出ていることがわかった。そのため、窓と反対側のポートにある第4ミラー調節用のベローズを少し伸ばすことで、第4ミラーをジャイロトロン軸から少し遠ざけ、窓からの信号強度が窓中心で最大になるように調整した。

その後、発振信号が強くなる条件をさがし、かつ、パルス幅を徐々に伸ばしていった。そこで、ターゲット板を窓前面に置き、窓からの放射ビームを当て、その温度上昇を赤外線カメラで測定することで、窓からの放射パターン



図6 マグネットに設置したFU CW GI

を観測した。その結果を図7に示す。全体的にはほぼ円形の温度上昇が得られた。また、ビーム位置もほぼ窓中心の高さにある。このように、丸く変換されたビームを窓から引き出すことに成功し、ジャイロトロン内部でガウスビームへの変換がうまく行われたことを確認した。

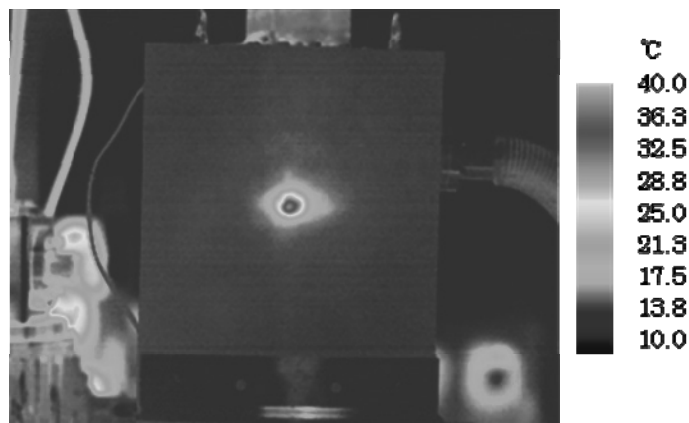


図7 ジャイロトロン窓からの放射パターン測定

次に、再び焦電型検出器を置き、カソード電圧 V_k を 16kV に設定して、主磁場強度 B を変化させることで検出される信号の様子の変化を観測した。その結果を図 8 の実線で示す。電源表示磁場強度 7.45 T から 7.6 T の範囲で発振信号を確認し、最大信号強度は $B = 7.49$ T で得られた。同じ図に、 $V_k = 16$ kV, $I_b = 0.5$ A, ピッチ因子 $\alpha = 1.2$ のとき計算によるキャビティ出口での出力計算値を破線で示す。計算による予想発振磁場強度にくらべて、実験では 0.1 T ほど高磁場側で発振した。発振磁場がずれた原因として以下の 3 つが考えられる。(1) キャビティ半径が設計値よりも小さい。(2) 発振しているモードが設計の TE_{5,2} モードとは異なる。(3) 電源の表示磁場強度が真値からずれている。

このうち (2) はその可能性は小さい。仮に発振モードが異なるとすると、考えられるモードの候補は TE_{9,1} モードであるが、TE_{9,1} モードは発振するとすれば co-rotating モードである。しかし、今の変換器は counter-rotating mode 用につくられているので、共振器で co-rotating モードの電磁波が発振しても、ジャイロトロン窓からきれいなビームとしては出てこない。[6] また、モードが異なると、変換器の特徴から、窓から放射されるビーム方向の水平位置がずれる。[6] 初期ミラー設定位置で水平方向にはほぼ期待通りの位置にビームが出たことを考えると、発振モードは TE_{5,2} と考えてよい。

(1) のキャビティ半径が設計値よりも小さいならば、発振電磁波の周波数を測定すれば、設計値の 203 GHz より高く出るはずである。発振が確認された磁場強度からは、~205 GHz の周波数が予想される。そこで、ヘテロダイン受信器を用いて周波数測定を行った。その結果、周波数は 202.55 GHz と予想に反して設計値より低い値となった。周波数の測定値と設計値との差は 0.45 GHz であり、この差はキャビティ半径に換算すると $5\mu\text{m}$ ほど実際の半径が設計半径より大きいことになる。 $5\mu\text{m}$ の差は、工作精度の範囲内であり、十分受け入れられる値であるが、測定磁場強度と計算磁場強度のずれを説明することはできない。現在のところ、磁場強度のずれの原因としては (3) の電源の表示磁場強度に 1 % 以上の差がある可能性が高いが、これを確かめるためには、磁場の絶対強度測定を行う必要がある。

出力評価を行うために、できるだけ発振のデューティをあげられるようにショットを重ねた。その中で、繰り返し周波数 1 Hz, デューティ 10 % を達成

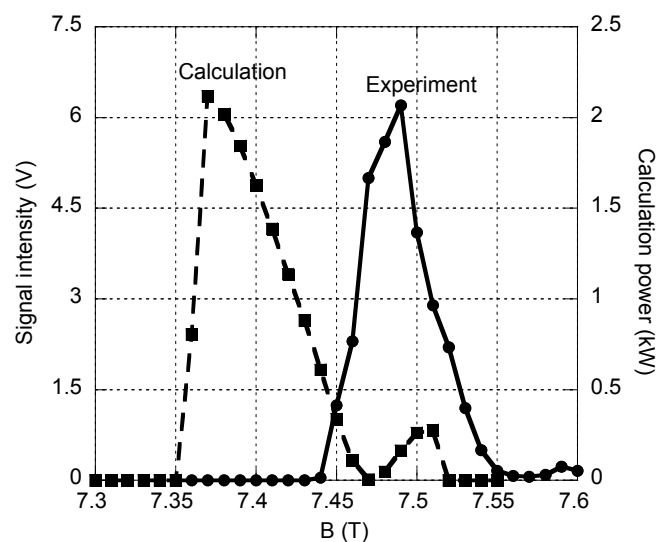


図 8 発振信号の設定磁場強度依存（実線）と、計算によるキャビティ出口出力（破線）

し、100 ms 長のパルス発振を実現した。出力測定はジャイロトロン窓前面に水負荷を置き、水負荷に水を流し、ショット中の水の温度上昇より出力を評価した。カソード電圧の設定値 V_k を変え、各 V_k で得られた最大出力を図 9 にプロットした。 V_k に対して出力の増大が観測され、設定電圧 20 kV で～500 W の出力を得た。ビーム電圧を 0.5 A とすると、窓からの出力の効率は～5 % である。

出力計算では $V_k = 15$ kV で、キャビティ出口での出力は～2 kW であった。ピッチ因子の分散や、ガウスビームへの変換効率、窓での損失等を考えて、窓からの出力として～1 kW、効率～13 % を期待していたが、実験での効率は設計値には達していない。この理由としては、

1 つめには電子銃に問題があると考えられる。今回とりつけた電子銃は、もともと $I_b \sim 10$ A を流すジャイロトロン用に設計され、使用されていたものであり、本ジャイロトロンの運転条件の $I_b \sim 0.5$ A に対してかなりのオーバースペックである。さらに、前のジャイロトロンで使用後、真空封じをして保管していたが、ヒーター電圧に対して流れるビーム電流量は、以前に比べ明らかに落ちており、エージング時の記録を比較すると、同じヒーター電圧に対して 2 割ほどしかビーム電流を引き出せていない。また、アノード-カソード間に 10 kV 以上の電位差を与えないとビームが引きだせない。設計では、図 2 に示すように、6 ～ 7 kV の電圧が最適と考えられており、10 kV もかけると、電子銃表面での引き出し電場が強くなりすぎ、計算上はミラー効果によって電子のほとんどは、キャビティまで到達しない。以前この電子銃を用いていたジャイロトロンでは 6 ～ 7 kV の電位差

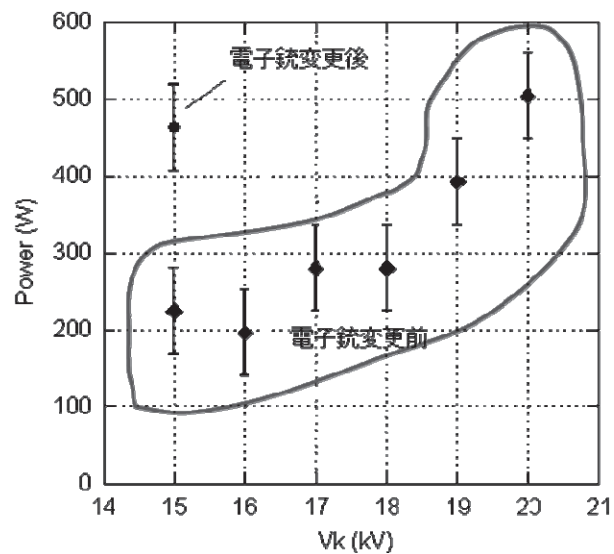


図 9 カソード電圧設定値に対する出力測定結果

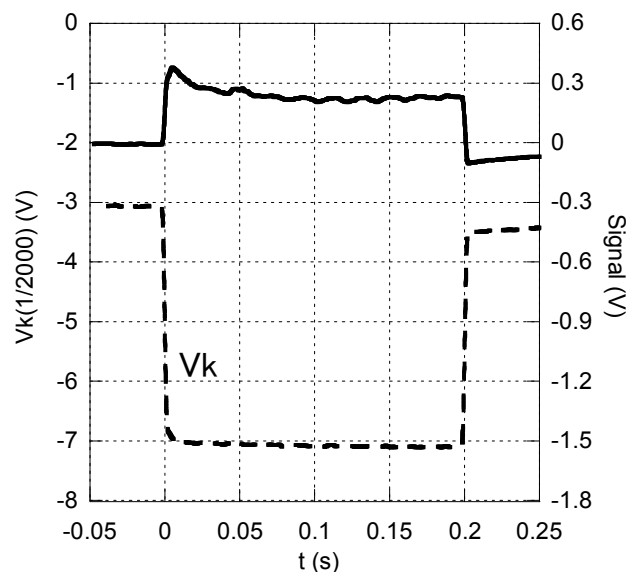


図 10 電子銃交換後の発振波形（実線）とカソード電圧（破線）の例

でもビームが出ていたので、これも電子銃の劣化のせいと考えられる。そこで、電子銃を同じタイプの別の物と交換して実験を行った。そのときの波形の一例を図 10 に示す。実線が焦電型検出器による発振信号、破線がカソード電圧である。200 ms 間安定な発振を達成した。カソード電圧の設定値は 15 kV であるが、実際の電圧は ~ -14 kV である。アノード電位は -7 kV であり、アノードーカソード間電圧は ~ 7 kV と以前に比べて低い電圧でも発振するようになった。パワー測定を行ったところ 図 9 に示すように $V_k = 15$ kV で ~ 450 W を得た。

その他の問題として、カソード電圧が印加中一定でなく、電圧印加直後から電圧が下がり、しばらくして回復するようなショットが現れる。発振の繰り返し周波数を高くすると、このようなカソード電圧が変化するショットが 2 ショットに 1 ショットの頻度で起きる。電圧の変動は発振に影響を与え、電圧が低いところでは、発振信号が極端に小さくなる。カソード電圧については、今後回路を見直し、その原因をさぐるための実験を行う。この問題がクリアされれば、設計出力 ~ 1 kW は、達成されるものと期待する。

4. まとめ

福井大学ではじめてガウスビームへの変換器を内蔵するタイプのジャイロトロンの設計・製作を行った。既存のマグネット・電子銃を使用することとし、その条件の下で、最大限の発振効率をあげられるよう、かつ変換器を制約されたスペースに納められるよう、発振モードを注意深く選定した。発振モードは counter TE_{5,2} モードとし、これに対応する変換器を製作した。丸い断面形状のビームを窓から引き出すことに成功し、ジャイロトン内部でガウスビームへの変換がうまく行われたことを確認した。周波数は 202.55GHz、窓からの出力として現在までに 500 W を観測した。今後、カソード電圧波形が改善されれば、設計出力 ~ 1 kW を達成できる。

参考文献

- [1] K. Sakamoto et al., *Nature Phys.* **3**, 411(2007).
- [2] K. Felch et al., *Nucl. Fusion* **48**, 054008 (2008)
- [3] 漆崎他, 遠赤外領域開発研究第 10 巻 p.30 (2009).
- [4] Y. Fujii et al., 遠赤外領域開発研究第 11 巻 p.73 (2010).
- [5] A Möbius and M Thumm, in “*Gyrottron Oscillators, Their Principles and Practice*”, ed. C.J.Edigcombe, p.179 (1993).
- [6] Y. Tatematsu et al., 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, We-P.16(2010).